



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF xxxx-xxxx

医用磁共振成像系统全身 SAR 测 量装置校准规范

Calibration Specification of Whole Body SAR Measurement

Equipment for MRI systems

(征求意见稿)

xxxx-xx-xx 发布

xxxx-xx-xx 实施

国家市场监督管理总局发布

医用磁共振成像系统 全身 SAR 测量装置校准规范

Calibration Specification of

Whole Body SAR Measurement Equipment for MRI systems

JJF xxxx-xxxx

归口单位：全国医学计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

参加起草单位：中国信息通信研究院

上海联影医疗科技股份有限公司

本规范委托全国医学计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

李成伟（中国计量科学研究院）

张 璞（中国计量科学研究院）

林浩宇（中国计量科学研究院）

参加起草人：

黄正山（中国计量科学研究院）

李从胜（中国信息通信研究院）

邢晓聪（上海联影医疗科技股份有限公司）

目录

引 言.....	II
1 范围.....	1
2 引用文件	1
3 术语和计量单位	1
4 概述.....	2
5 计量特性	2
5.1 光纤测温装置	2
5.2 SAR 模体	2
6 校准条件	3
6.1 环境条件	3
6.2 测量标准及其他设备	3
7 校准项目与校准方法.....	3
7.1 外观及功能性检查	3
7.2 光纤测温装置	4
7.3 SAR 模体	4
8 校准结果表达.....	5
8.1 校准记录	5
8.2 校准结果的处理	5
9 复校时间间隔.....	6
附录 A 医用磁共振成像系统全身 SAR 测量装置原始记录（推荐）格式样式....	7
附录 B 校准证书内页（推荐）格式样式.....	8
附录 C 光纤测温探头温度示值误差校准结果不确定度评定示例	10
附录 D 溶液电导率值校准结果不确定度评定示例	14

引 言

JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列文件。

本规范的制定参考和引用了以下技术标准的部分内容：JJF 1843-2020《射频电磁场暴露量比吸收率（SAR）测量仪校准规范》、JJF 1630-2017《分布式光纤温度计校准规范》、JJF 1495-2014《矢量网络分析仪校准规范》、JJG 376-2007《电导率仪》、YY 9706.233-2021《医用电气设备 第2-33部分：医疗诊断用磁共振设备的基本安全和基本性能专用要求》。

本规范为首次发布。

医用磁共振成像系统全身 SAR 测量装置校准规范

1 范围

本规范适用于医用磁共振成像（Magnetic Resonance Imaging, MRI）系统全身 SAR 测量装置的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 2151—2024 医用磁共振成像系统校准规范

JJF 1843—2020 射频电磁场暴露量比吸收率（SAR）测量仪校准规范

JJF 1630—2017 分布式光纤温度计校准规范

JJF 1495—2014 矢量网络分析仪校准规范

JJG 376—2007 电导率仪

YY 9706.233—2021 医用电气设备 第 2-33 部分：医疗诊断用磁共振设备的基本安全和基本性能专用要求

ASTM F2182—19 磁共振成像过程中无源植入物附近射频致热标准测试方法（Standard Test Method for Measurement of Radio Frequency Induced Heating On or Near Passive Implants During Magnetic Resonance Imaging）

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和计量单位

JJF 1843-2020、JJF 1630-2017、JJG 376-2007 和 YY 9706.233-2021 界定的下列术语和定义适用于本规范。

3.1 特定吸收率 specific absorption rate (SAR)

单位质量吸收的射频功率，也称比吸收率。单位 W/kg。

[来源：YY 9706.233-2021，201.3.233；JJF 1843-2020，3.1，有修改]

3.2 光纤测温装置 fiber-optic thermometer

利用光纤几何上的一维传输特性进行温度连续测量的系统。

[来源：JJF 1630-2017，3.1，有修改]

3.3 （电解质溶液的）电导率 electrical conductivity

溶液中电流密度与电场强度的比值，单位 S/m。

[来源：JJG 376-2007，3.2，有修改]

3.4 相对介电常数 relative permittivity

表征介质材料的介电性质或极化性质的物理参量。也称相对介电常量。

4 概述

医用磁共振成像系统全身 SAR 测量装置是用于测量医用磁共振成像系统（以下简称“MRI 系统”）全身 SAR 的专用设备，一般包含光纤测温装置和 SAR 模体。其中，光纤测温装置由光纤测温探头、控制单元和处理器组成，能够实现医用 MRI 系统所在屏蔽间室温、SAR 模体内部溶液温度的测量。SAR 模体一般采用亚克力制成，模体内部填充具有人体躯干电磁学等效特性的溶液。

5 计量特性

5.1 光纤测温装置

温度测量范围：15 °C ~ 45 °C，最大允许误差：±0.1 °C。

5.2 SAR 模体

5.2.1 模体内部溶液的电导率值为 0.47 S/m，最大允许误差：±10%；

5.2.2 128 MHz 与 64 MHz 测量频率下，模体内部溶液的相对介电常数值为 80，最大允许误差：±20；

5.2.3 模体内灌注溶液的质量应不小于 10 kg。

注：以上所有指标不适用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：（20 ± 5）℃；

6.1.2 相对湿度：≤80%；

6.1.3 供电电源：（220 ± 22）V，（50 ± 1）Hz；

6.1.4 周围无明显影响系统正常工作的机械振动和电磁干扰。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 自校式数字测温仪

温度测量范围：10℃~50℃，扩展不确定度： $U = 0.03\text{℃}$ ($k=2$)。

6.2.2 恒温槽

设定温度范围：10℃~50℃，温度波动性（15min）不大于 0.1℃。

6.2.3 电导率仪

量程至少覆盖 0.1 S/m ~1.0 S/m，扩展不确定度： $U = 0.01\text{ S/m}$ ($k=2$)。

6.2.4 矢量网络分析仪

量程至少覆盖 50 MHz~4500 MHz，扩展不确定度： $U = 0.2\text{ dB}$ ($k=2$)。

6.2.5 介电常数探头

量程至少覆盖 4 MHz~3000 MHz，扩展不确定度： $U = 0.025$ ($k=2$)。

6.2.6 电子秤

量程大于 20 kg，扩展不确定度： $U = 10\text{ g}$ ($k=2$)。

7 校准项目与校准方法

7.1 外观及功能性检查

被校医用磁共振成像系统全身 SAR 测量装置（以下简称“被校全身 SAR 装置”）应包含光纤测温装置和 SAR 模体两部分，每部分标识应清晰，具有生产厂家、型号、出厂编号等信息；结构应完整，无影响正常工作和校准的缺陷或机械损伤。光纤测温装置至少包含 3 只光纤测温探头且均能正常工作。SAR 模体校准前应保证模体内部洁净干燥，溶液单独密封存放。SAR 模体的密封性应保持良好的，溶液灌注应充满整个腔体且无空隙或气泡，灌注后应无漏液等情况。

7.2 光纤测温装置

7.2.1 校准前的准备

每只光纤测温探头校准时，将光纤测温探头前端感温部分插入恒温槽中并固定，确保感温部分处于恒温槽中液体中部。打开自校式数字测温仪电源，待自校完成后将其温度探头插入恒温槽中并固定，使其与光纤测温探头感温部分处于相同位置。

7.2.2 温度示值误差校准

校准时，将恒温槽初始温度设置为 15℃，然后每隔 5℃进行一次温度调节，直至恒温槽温度达到 45℃。每次温度调节后，待自校式数字测温仪读数稳定后，连续读取 10 次读数，取平均值记为该校准点下的温度标准值 $\overline{T_{0i}}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 7$)；同时连续读取被校光纤测温探头温度示值 10 次，取平均值作为该校准点下的温度测量值 $\overline{T_{mi}}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 7$)。示值误差按照公式 (1) 进行计算：

$$\Delta T = \overline{T_{mi}} - \overline{T_{0i}} \quad (1)$$

式中：

ΔT —温度的示值误差，℃；

$\overline{T_{mi}}$ —光纤测温探头温度测量值，℃；

$\overline{T_{0i}}$ —自校式数字测温仪测得的温度标准值，℃。

7.3 SAR 模体

7.3.1 模体内溶液电导率值校准

设置恒温槽温度为 25℃，将模体内溶液倒出部分至样品杯，并将样品杯放

入恒温槽。使用自校式数字测温仪测量溶液温度，待溶液温度稳定后，将电导率仪的测量探头放入溶液中。电导率值读数稳定后，连续测量 3 次，取平均值作为溶液电导率值的测量结果 $\bar{\sigma}$ 。

7.3.2 模体内溶液相对介电常数校准

正确连接矢量网络分析仪与介电常数探头，介电常数探头扫频范围应包含 64 MHz 和 128 MHz。待介电常数探头自校准完成后，使用自校式数字测温仪测量溶液温度，并输入介电常数探头配套的测量软件内。使用介电常数探头测量溶液相对介电常数时，应保证探头表面无气泡。分别在 64 MHz 和 128 MHz 下，连续测量 3 次，取平均值为作为溶液相对介电常数的测量结果 $\bar{\epsilon}_j$ ($j=64\text{ MHz}$ 或 128 MHz)。

7.3.3 溶液质量校准

打开电子秤，待自校完成后将未灌注溶液的 SAR 模体放置在电子秤称重托盘中间区域，连续测量 3 次，取平均值作为 SAR 模体外壳质量 $\bar{m}_1$ 。然后，用溶液灌满 SAR 模体并排空气泡或空隙。灌注完成后，将 SAR 模体放置在电子秤称重托盘中间区域，连续测量 3 次，取平均值作为 SAR 模体总质量 $\bar{m}_2$ 。按照公式 (2) 计算溶液质量 Δm 。

$$\Delta m = \bar{m}_2 - \bar{m}_1 \quad (2)$$

式中：

Δm — 溶液质量，kg；

$\bar{m}_1$ — SAR 模体外壳质量，kg；

$\bar{m}_2$ — SAR 模体灌注溶液后总质量，kg。

注：SAR 模体首次灌注或更换溶液时进行该项目校准。

8 校准结果表达

8.1 校准记录

校准记录格式参见附录 A。

8.2 校准结果的处理

校准证书内页格式参见附录 B，校准证书应至少包括以下内容：

- a) 标题，如“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果不在实验室内校准）；
- d) 证书或报告的唯一性标识（如证书编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校准医用磁共振成像系统全身 SAR 测量装置的描述和明确标识（如型号、产品编号等）；
- g) 进行校准的日期或校准证书的生效日期；
- h) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称和代号；
- i) 校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- j) 校准环境的描述；
- k) 校准结果及测量不确定度的说明；
- l) 校准员及核验员的签名；
- m) 校准证书批准人的签名；
- n) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- o) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔不超过 12 个月。

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定的，因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

医用磁共振成像系统全身 SAR 测量装置原始记录（推荐）格式样式

证书单位		证书编号			
单位地址		校准地点			
型号/规格		仪器编号			
生产厂商		温度	℃	相对湿度	%RH
校准依据					
校准使用的计量基（标）准装置（含标准物质）或设备					
名称	测量范围	不确定/准确度等级	证书编号	证书有效期	
光纤测温装置					
1、温度示值误差					
通道号：_____		光纤测温探头编号：_____			
测量次数	1	2	3	平均值	
温度类型					
自校式数字测温仪（℃）					
光纤测温探头（℃）					
示值误差（℃）					
SAR 模体					
1、溶液电导率值					
测量次数	1	2	3	平均值	
测量结果					
电导率测量值（S/m）					
2、溶液相对介电常数					
测量次数	1	2	3	平均值	
测量结果					
相对介电常数测量值 （64MHz）					
相对介电常数测量值 （128MHz）					
3、溶液质量					
测量次数	1	2	3	平均值	
测量结果					
SAR 模体外壳质量（kg）					
SAR 模体总质量（kg）					
溶液质量（kg）					

校准员：

核验员：

校准日期： 年 月 日

接收日期： 年 月 日

附录 B

校准证书内页（推荐）格式样式

校准证书第 1 页

证书编号：XXXX-XXXX				
校准机构授权说明				
校准所依据/参照的技术文件（代号、名称）				
校准环境条件及其地点：				
温度： ℃ 相对湿度： %				
地点：				
其它：				
测量标准及其他设备				
名称	测量范围	不确定度/准确度等级/最大允许误差	证书编号	有效期至

校准证书第 2 页

证书编号: XXXX-XXXX

校准结果

1. 光纤测温装置: 温度示值误差校准结果

(1) 通道号: _____; 光纤测温探头编号: _____

温度校准点 (℃)	15	20	25	30	35	40	45
自校式数字测温 仪测量结果 (℃)							
光纤测温探头测 量结果 (℃)							
温度示值误差 (℃)							
不确定度							

2. SAR 模体

(1) 溶液电导率值校准结果: $\bar{\sigma} =$ _____ S/m, 不确定度 $U=$ _____。;(2) 溶液相对介电常数校准结果: $\bar{\epsilon} =$ _____, 不确定度 $U=$ _____。;(3) 溶液质量结果: $\Delta m =$ _____ kg, 不确定度 $U=$ _____。

附录 C

光纤测温探头温度示值误差校准结果不确定度评定示例

依据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》的要求，以用恒温槽模拟环境温度为 25℃ 下的光纤测温探头校准结果为例，给出光纤测温探头温度示值误差校准结果测量不确定度的评定过程。其中包括各分量标准不确定度评定、合成标准不确定度以及扩展不确定度计算等。

C.1 建立数学模型

用自校式数字测温仪对光纤测温探头的示值温度进行校准时，可建立如下数学模型：

$$\Delta T = \overline{T_{mi}} - \overline{T_{0i}} \quad (C.1)$$

式中：

ΔT —示值误差，℃；

$\overline{T_{mi}}$ —光纤测温探头温度测量结果，℃；

$\overline{T_{0i}}$ —自校式数字测温仪测得的温度标准值，℃。

各影响量的灵敏系数计算如下：

$$C(\overline{T_{mi}}) = \frac{\partial \Delta T}{\partial \overline{T_{mi}}} = 1$$

$$C(\overline{T_{0i}}) = \frac{\partial \Delta T}{\partial \overline{T_{0i}}} = -1$$

各分量的标准不确定度为：

$$u_1 = |C(\overline{T_{mi}})|u(\overline{T_{mi}})$$

$$u_2 = |C(\overline{T_{0i}})|u(\overline{T_{0i}})$$

u_1 和 u_2 相互独立，因此有：

$$u_C = (u_1^2 + u_2^2)^{1/2}$$

C.2 分量标准不确定度分析

C.2.1 光纤测温探头温度测量结果 $\overline{T_{mi}}$ 的测量不确定度

1) 测量重复性引入的标准不确定 $u_1(\overline{T_{mi}})$

$u_1(\overline{T_{mi}})$ 是测量重复性引入的标准不确定度,以恒温槽 25 °C 下的校准点为例,用自校式数字测温仪对光纤测温探头进行 10 次独立重复校准,标准偏差 $S(\overline{T_{mi}})$ 采用贝塞尔公式法计算。具体数据见下表 C1:

表 C1 光纤测温探头测量重复性

单位: °C

标准 值	测量值										实测 均值	标准 偏差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
25.01	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	0.00

由于在光纤测温探头温度的校准中,对每个温度点分别进行 10 次测量,故由重复性引入的不确定度分量为:

$$u_1(\overline{T_{mi}}) = \frac{S(\overline{T_{mi}})}{\sqrt{10}} = \frac{0.0}{\sqrt{10}} = 0.00 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) 光纤测温探头分辨力引入的标准不确定度 $u_2(\overline{T_{mi}})$

光纤测温探头的温度显示分辨力为 $\delta=0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$,由自身分辨力引起的标准不确定度 $u_2(\overline{T_{mi}})$ 为:

$$u_2(\overline{T_{mi}}) = (\delta/2)/\sqrt{3} \approx 0.03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3) 环境温度、湿度变化引入的标准不确定度 $u_3(\overline{T_{mi}})$

在光纤测温探头的正常使用环境条件下,由于恒温槽的温度波动极小,该项可以忽略不计。

4) 光纤测温探头温度测量结果 $\overline{T_i}$ 的测量不确定度 $u(\overline{T_{mi}})$

以上各分量相互独立,因此血氧饱和度值测量结果的标准不确定度为:

$$u(\overline{T_{mi}}) = [u_1(\overline{T_{mi}})^2 + u_2(\overline{T_{mi}})^2 + u_3(\overline{T_{mi}})^2]^{1/2} = 0.03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

C.2.2 自校式数字测温仪测得的温度标准值 $\overline{T_{0i}}$ 的测量不确定度

1) 自校式数字测温仪测量不准确引入的标准不确定度 $u_1(\overline{T_{0i}})$

$u_1(\overline{T_{0i}})$ 是自校式数字测温仪测量的温度值引入的标准不确定度,该项可由

相关证书中得到。由自校式数字测温仪相关证书中可以得到其在 25 °C 下的测量不确定度 $U=0.004$ °C ($k=2$)。因此自校式数字测温仪测量温度值的标准不确定度为:

$$u_1(\overline{T_{0i}}) = 0.004/2 = 0.002 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) 自校式数字测温仪分辨力引入的标准不确定度 $u_2(\overline{T_{0i}})$

自校式数字测温仪的分辨力为 $\delta=0.001$ °C, 由自身分辨力引起的标准不确定度 $u_2(\overline{T_{0i}})$ 为:

$$u_2(\overline{T_{0i}}) = (\delta/2)/\sqrt{3} \approx 0.0003 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3) 环境温度、湿度变化引入的标准不确定度 $u_3(\overline{T_{0i}})$

在校准装置的正常使用环境条件下, 由于恒温槽受温度、湿度影响变化小, 该项可以忽略不计。

4) 自校式数字测温仪测得的温度标准值 $\overline{T_{0i}}$ 的测量不确定度 $u(\overline{T_{0i}})$

以上各分量相互独立, 因此温度标准值 $\overline{T_{0i}}$ 的标准不确定度为:

$$u(\overline{T_{0i}}) = [u_1(\overline{T_{0i}})^2 + u_2(\overline{T_{0i}})^2 + u_3(\overline{T_{0i}})^2]^{1/2} \approx 0.002 \text{ } ^\circ\text{C}$$

C.3 合成标准不确定度

表 C2 不确定度分量汇总表

不确定度分量		不确定度分量来源	标准不确定度 (°C)	灵敏系数 $ c_i $
$u(\overline{T_{mi}})$	$u_1(\overline{T_{mi}})$	光纤测温探头测量重复性	0.00	1
	$u_2(\overline{T_{mi}})$	光纤测温探头分辨力	0.03	
	$u_3(\overline{T_{mi}})$	环境温度、湿度变化	0.00	
$u(\overline{T_{0i}})$	$u_1(\overline{T_{0i}})$	自校式数字测温仪测量不确定度	0.0002	1
	$u_2(\overline{T_{0i}})$	自校式数字测温仪分辨力	0.0003	

	$u_3(\overline{T_{0i}})$	环境温度、湿度变化	0.00	
--	--------------------------	-----------	------	--

各不确定度分量汇总见表 C2。各不确定度分量不相关，故光纤测温探头温度校准结果示值误差的合成标准不确定度 u_c 为：

$$u_c = \sqrt{[C(\overline{T_{mi}})u(\overline{T_{mi}})]^2 + [C(\overline{T_{0i}})u(\overline{T_{0i}})]^2} \approx 0.03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

C.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度 U 为：

$$U = ku_c = 2 \times 0.03 = 0.06 \text{ } ^\circ\text{C}, (k=2)。$$

附录 D

溶液电导率值校准结果不确定度评定示例

依据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》的要求，以电导率标称值为 0.47 S/m 的溶液电导率值校准结果为例，给出溶液电导率值校准结果测量不确定度的评定过程。其中包括各分量标准不确定度评定、合成标准不确定度以及扩展不确定度计算等。

D.1 建立测量模型

$$\sigma = \bar{\sigma} \quad (\text{D.1})$$

式中：

σ — 溶液电导率值的最终测量结果，S/m；

$\bar{\sigma}$ — 溶液电导率值测量平均值，S/m；

由测量模型可得灵敏度系数为：

$$c_{\bar{\sigma}} = 1$$

因此合成标准不确定度为：

$$u_C = \sqrt{c_{\bar{\sigma}}^2 u(\bar{\sigma})^2} = |c_{\bar{\sigma}}| u(\bar{\sigma})$$

D.2 分量标准不确定度评定

D.2.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(\bar{\sigma})$

$u_1(\bar{\sigma})$ 是测量重复性引入的标准不确定度，在规定的实验室环境温度下用电导率仪对溶液的电导率进行测量，以 3 次独立重复测量结果的平均值作为待测溶液的电导率值。3 次测量值及其标准偏差见下表，其中标准偏差采用极差法计算。（极差系数 $c_3=1.69$ ）

表 D.1 电导率值测量重复性

单位：S/m

测量值			平均值	标准偏差 s
1	2	3		
0.478	0.479	0.478	0.4783	0.0006

校准时，以 3 次测量结果的平均值作为最终校准结果，因此由重复性引入的标准不确定度分量为：

$$u_1(\bar{\sigma}) = s/\sqrt{3} = 0.0004 \text{ S/m}$$

D.2.2 温度、湿度变化引入的标准不确定度 $u_2(\bar{\sigma})$

溶液电导率会随着温度的变化而变化。但因为溶液样品置于恒温水槽中，其温度波动性（15min）不大于 0.1 °C，且连续读取溶液电导率值的时间较短，因此这一项由于温度变化带来的不确定度分量 $u_2(\bar{\sigma})$ 可忽略不计。

D.2.3 电导率仪测量不准确引入的标准不确定度分量 $u_3(\bar{\sigma})$

由于电导率仪的最大允许误差为 $\pm 0.007 \text{ S/m}$ ，认为测量结果呈均匀分布，则由其引入的标准不确定度分量为：

$$u_3(\bar{\sigma}) = 0.007/\sqrt{3} \approx 0.004 \text{ S/m}$$

D.2.4 电导率仪测量结果引入的标准不确定度 $u(\bar{\sigma})$

$$u(\bar{\sigma}) = \sqrt{[u_1(\bar{\sigma})]^2 + [u_2(\bar{\sigma})]^2 + [u_3(\bar{\sigma})]^2} = 0.004 \text{ S/m}$$

D.3 合成标准不确定度

各不确定度分量见表 D.2。

表 D.2 电导率值校准结果不确定度分量

不确定度分量		不确定度分量来源	标准不确定度 (°C)	灵敏系数 $ c_i $
$u(\bar{\sigma})$	$u_1(\bar{\sigma})$	测量重复性引入的	0.0004	1
	$u_2(\bar{\sigma})$	环境温度、湿度变化（忽略不计）	0.000	
	$u_3(\bar{\sigma})$	电导率仪测量不准确引入的	0.004	

合成标准不确定度为：

$$u_c = |c_{\bar{\sigma}}| \sqrt{[u_1(\bar{\sigma})]^2 + [u_2(\bar{\sigma})]^2 + [u_3(\bar{\sigma})]^2} = 0.004 \text{ S/m}$$

D.4 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，则扩展不确定度 U 为：

$$U = ku_c(\sigma) = 2 \times 0.004 = 0.008 \text{ mS/cm}, \quad (k=2)$$
